

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/286900931>

# ANÁLISE DAS TENSÕES E DEFORMAÇÕES POR MEIO DE EXTENSOMETRIA EM UMA FERRAMENTA DE ESTAMPAGAM...

Conference Paper · October 2015

CITATIONS

0

READS

72

6 authors, including:



[Gustavo dos Santos De Lucca](#)

Faculdade SATC - Portal Satc

3 PUBLICATIONS 0 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



[Lirio Schaeffer](#)

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

215 PUBLICATIONS 241 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



[Daniel Fritzen](#)

Faculdade SATC - Portal Satc

8 PUBLICATIONS 8 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



[Jovani Castelan](#)

Faculdade SATC - Portal Satc

18 PUBLICATIONS 85 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Tool for Forgings [View project](#)



# 35th SENAFOR

19th International Forging Conference / Brazil

18th National Sheet Forming Conference / 5th International Sheet Metal Forming Conference / 2nd BDRG Congress

5th RenoMat - International Conference on Materials and Processes for Renewable Energy

Porto Alegre-RS-Brazil – October 7<sup>th</sup> to 9<sup>th</sup>, 2015

## ANÁLISE DAS TENSÕES E DEFORMAÇÕES POR MEIO DE EXTENSOMETRIA EM UMA FERRAMENTA DE ESTAMPAGAM INCREMENTAL

### ANALYSIS OF STRESS AND STRAIN IN AN INCREMENTAL SHEET FORMING TOOL USING EXTENSOMETRY

G. De Lucca<sup>(1)</sup>  
L. Schaeffer<sup>(2)</sup>  
D. Fritzen<sup>(3)</sup>  
A. Dallefe<sup>(4)</sup>  
J. L. Salvador<sup>(5)</sup>  
J. Castelan<sup>(6)</sup>

#### Abstract

Numerous research and industrial applications of Incremental Sheet Forming make use of machining centers or other devices with similar configurations. Although the technique is already diffused a long time, there is no in-depth studies in Brazil about the forces acting on the axes X, Y and Z of these machines. Not knowing the values and vectors of forces, there is no way to know if the equipment is being overcharged or not. Moreover, the lack of understanding of the forces prevents the development of a specific Incremental Sheet Forming machine, since the sizing of the physical structure must take into account these forces. In this work, we performed analysis of tensions and strain applied in a tool used to make the Incremental Sheet Forming Process, using Extensometry technique.

**Keywords:** Incremental Sheet Forming, Extensometry, Strain Gages.

#### Resumo

Numerosas pesquisas e aplicações industriais da Estampagem Incremental fazem uso de Centros de Usinagem ou outros dispositivos com configurações semelhantes. Embora a técnica já esteja difundida a muito tempo, não há estudos aprofundados no Brasil sobre as forças que atuam sobre os eixos X, Y e Z destas máquinas. Não conhecendo os valores e vetores de forças, não há como saber se o equipamento está sendo sobrecarregado ou não. Por outro lado, o desconhecimento acerca das forças impede o desenvolvimento de uma máquina específica de Estampagem Incremental, já que o dimensionamento da estrutura física deve levar em conta essas forças. Neste trabalho foram efetuadas análises de tensões e deformações aplicadas em uma ferramenta usada para o processo de Estampagem Incremental de Chapas, usando a técnica de Extensometria.

**Palavras-chave:** Estampagem Incremental de Chapas, Extensometria, *Strain Gages*.

## 1. INTRODUÇÃO

A Estampagem Incremental tem demonstrado um grande potencial para desenvolvimento e fabricação de complexas peças tridimensionais, conformando componentes sem ferramental específico, a ISF (*Incremental Sheet Forming*) torna-se

<sup>(1)</sup> Prof., Faculdade SATC, gustavo.lucca@satc.edu.br

<sup>(2)</sup> Prof. Dr. Ing; Universidade Federal do Rio Grande do Sul, schaeffer@ufrgs.br

<sup>(3)</sup> Prof. Msc.; Faculdade SATC, daniel.fritzen@satc.edu.br

<sup>(4)</sup> Prof. Dr.; Faculdade SATC, anderson.dallefe@satc.edu.br

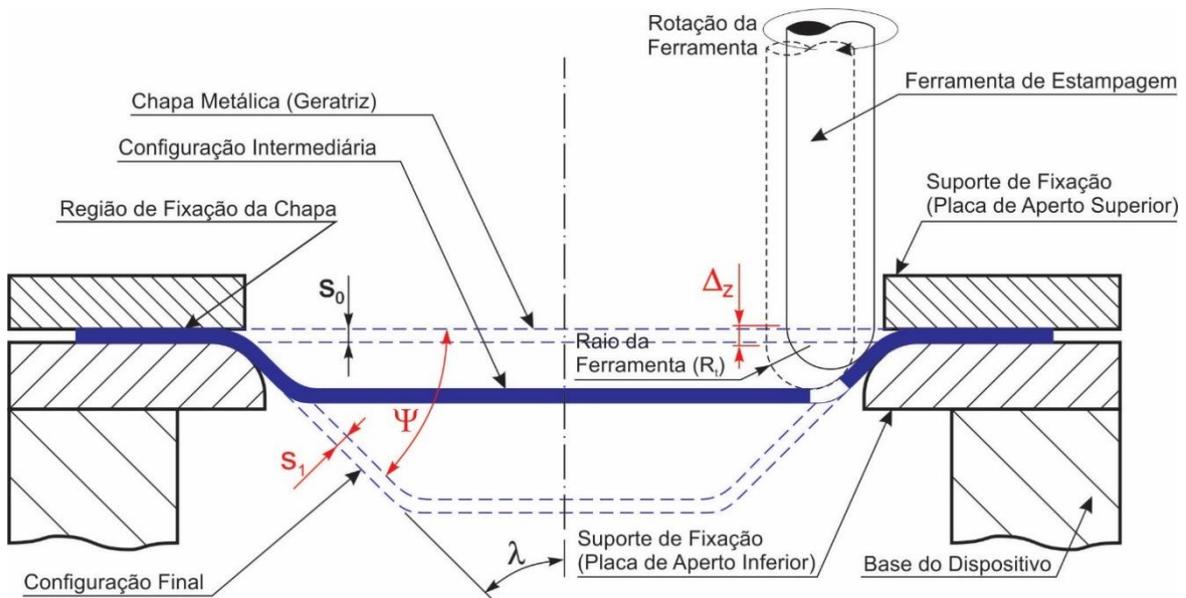
<sup>(5)</sup> Prof.; Faculdade SATC, jose.salvador@satc.edu.br

<sup>(6)</sup> Prof. Dr.; Faculdade SATC, jovani.castelan@satc.edu.br

uma forma economicamente competitiva para a fabricação de baixos volumes de peças. O processo de estampagem convencional de chapas baseia-se no deslocamento de um punção, acionado por uma prensa, contra uma ferramenta, comumente chamada de matriz, onde se encontra a chapa metálica. Conforme características geométricas do punção e da matriz, a chapa metálica plana assumirá o formato imposto por ambos. Pode-se citar diversas indústrias como sendo beneficiárias deste processo, tais como a indústria automotiva, máquinas agrícolas, aeroespacial, aparelhos e utensílios domésticos, construção civil, medicina, transportes, indústria eletroeletrônica, entre outras [1].

Visando a customização, a diferenciação, personalização, redução de custos, diminuição do “*lead-time*”<sup>1</sup> e produção sustentável, surge a estampagem incremental de chapas por meio de ferramentas dedicadas, sempre respeitando a fabricação de pequenos lotes ou modelos únicos. O processo de Estampagem Incremental é uma inovação tecnológica na área de deformação de chapas [2][3][4].

Pode-se observar na Figura 1, que em ISF, o *blank*<sup>2</sup>, chapa a ser conformada, é presa em um suporte regulável móvel, independente do formato final da chapa, que pode efetuar movimentos controlados na direção vertical, ou seja, paralelamente ao eixo Z, e nas direções horizontais de X e Y de um sistema CNC. Enquanto a estampagem estiver ocorrendo, elementos de fixação distribuídos em torno da chapa evitam que a mesma se movimente, criando assim uma deformação plástica na chapa. Acoplada ao *spindle* (eixo árvore) de um dispositivo CNC, uma ferramenta de cabeça semiesférica dá início ao processo de ISF por meio do movimento contínuo sobre a superfície da chapa e gradativamente ocorrendo a conformação por meio de incrementos verticais negativos [3].



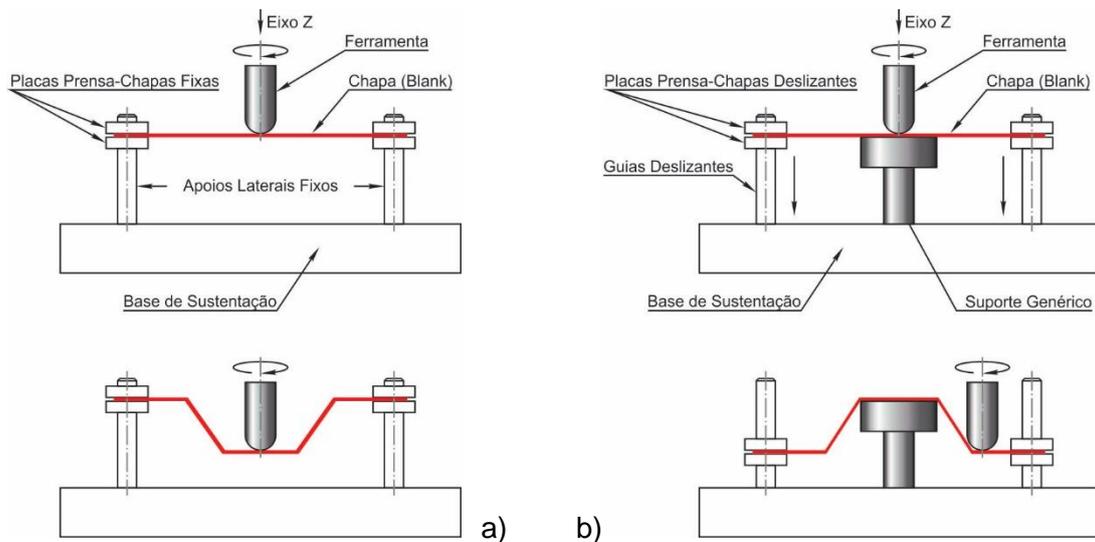
**Figura 1:** Processo de Estampagem de Ponto Simples (SPIF). Adaptado de [5].

O processo de estampagem incremental pode ser dividido essencialmente em duas modalidades, dependendo do número de pontos de contato entre ferramenta, chapa e matriz (quando presente). Por isso, é possível distinguir a estampagem incremental de ponto simples (*Single-Point Incremental Forming – SPIF*(Figura 2a)), e de ponto duplo (*Two Points Incremental Forming – TPIF*(Figura 2b)), sendo que nesta

<sup>1</sup> *Lead-time* ou ainda ciclo, na literatura remete a duas grandezas, sendo (a) em suprimentos, tempos relacionados as reposições de materiais e (b) em produção tempos relacionados ao atendimento das demandas de clientes. Sendo assim, *lead-time* pode ser considerado o tempo de atravessamento referente a transformação de matérias-primas em produtos acabados [21].

<sup>2</sup> Pedaco de metal laminado de onde devem ser recortadas peças.

modalidade, ainda pode ser subdividida conforme modelo da matriz, como positiva ou negativa e simétrica e assimétrica [3][6].



**Figura 2:** Representação Gráfica dos Processos de SPIF (a) e TPIF (b). Adaptado de [3].

As características técnicas da Estampagem Incremental conferem flexibilidade ao processo, tornando-se ideal para produção de protótipos, peças únicas ou pequenos lotes, e com características específicas, e desta maneira, o processo torna-se viável financeiramente. Para isto, é necessária uma melhor compreensão da mecânica do processo e dos parâmetros que o influenciam [7][8]

Diversos artigos relatam que os quatro principais parâmetros que influenciam no processo de ISF são: o diâmetro da ferramenta de estampagem ( $R_T$ ), o incremento vertical ( $\Delta z$ ), o ângulo de parede ( $\Psi$ ) e a espessura da chapa de metal ( $s_0$ ) [9][10][11][12].

As forças necessárias para a conformação têm grandes impactos nas ferramentas e acessórios utilizados no processo ISF, além de influenciar no maquinário necessário. Ser capaz de prever a magnitude das forças entre a ferramenta e a peça é de suma importância para o desenvolvimento de modelos de processos para ISF [9]. Além disso, instrumentação e controle devem ser alternativas como processos de medição, aferição e testes em processos industriais. Sendo uma das áreas da instrumentação a Extensometria, que se trata de uma técnica para a análise experimental de tensões e deformações em estrutura mecânicas ou de alvenaria [13].

As avaliações dos esforços baseiam-se nas descobertas de Robert Hooke (1678), que relacionam os esforços aplicados por meio da tensão gerada no material ( $\sigma$ ), com a deformação resultante ( $\epsilon$ ), pela Lei de Hooke ( $\sigma = E \cdot \epsilon$ ), sendo ( $E$ ) o módulo de elasticidade do material [14].

Os extensômetros ou *Strain Gages* são dispositivos usados para medir essas deformações elásticas em diferentes estruturas. A mensuração é feita colando o *Strain Gage* nestas estruturas, convertendo a deformação elástica causada em uma quantidade elétrica (voltagem) e amplificando-a para leitura em um local remoto. Deformações elásticas em várias partes de uma estrutura real ou peça sob condições de serviço podem ser medidas com boa precisão sem que a mesma seja destruída. Assim, isto leva a uma análise quantitativa da distribuição de deformação elástica sob condições reais de operação. Os *Strain Gages* fornecem um método de converter deformações elásticas em quantidade elétrica citando como características dos mesmos a alta precisão de medição, pequeno tamanho e pouco peso, excelentes repostas aos fenômenos dinâmicos, excelente linearidade, medições possíveis dentro de uma ampla faixa de temperatura, são aplicáveis submersos em água ou em atmosfera de gás corrosivo desde que usados os tratamentos adequados, usados como elementos

transdutores para medidas de várias quantidades físicas (força, pressão, torque, aceleração, deslocamento), entre outras [15].

Se um dado material é tracionado, a força (F) aplicada no material é proporcional à deformação causada na região elástica, mantendo uma relação constante entre a magnitude da força externa e a quantidade de deformação. Isto implica no fato de que a força para contrabalancear a ação externa é gerada internamente no material, e a magnitude de força por unidade de área é chamada de tensão ( $\sigma$ ). A tensão é um vetor, tendo uma magnitude e uma direção e expressa em termos de kgf/cm<sup>2</sup> ou qualquer outra relação de força por unidade de área [16].

Comumente os materiais tem a propriedade de se alongar quando tracionados e de encolher quando comprimidos. Considerando que o material seja tracionado, haverá uma deformação, que é definida pela relação em Alongamento Total ( $\Delta l$ ) pelo comprimento inicial ( $l$ ), Equação (1) [14].

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (1)$$

A tensão ( $\sigma$ ) é proporcional à deformação entre a origem e o ângulo ( $\alpha$ ) onde uma inclinação aproximadamente linear é obtida. Esta é a chamada região elástica onde se aplicam as leis de Hooke. A relação tensão-deformação na região elástica é dada pela Equação (2) [14]:

$$\frac{\sigma}{\varepsilon} = E \quad (2)$$

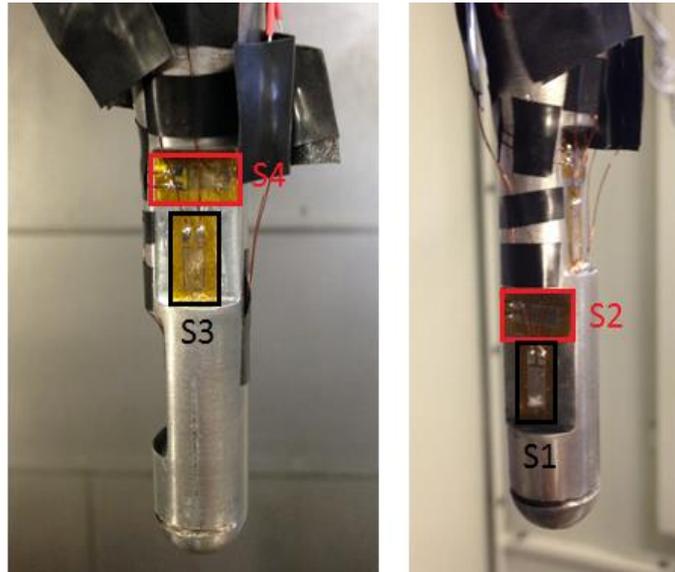
## 2. METODOLOGIA

Para o procedimento experimental algumas etapas foram cumpridas. O processo de calibração se deu com o uso de blocos padronizados com massa especificada cedido pelo Laboratório de Metrologia da Faculdade SATC – LAMETRO, nos valores de 5kg, 10kg e 20kg.

Para as leituras dos sinais apresentados pelos *Strain Gages*, foi utilizado um Sistema de Aquisição de Dados (DAQ) da HBM modelo MX840B, o mesmo consegue efetuar diversas medições e controles de sinais, sendo estes tratados com um amplificador universal de 8 canais, que é conectado a um computador via conexão FastEthernet (RJ-45).

Uma grande preocupação quando da aplicação de *Strain Gages*, é quanto à temperatura da peça durante o procedimento experimental, já que a variação da temperatura pode influenciar na deformação do material do *Strain Gage*. Como forma de monitoramento da temperatura, foi utilizado um termovisor da marca Fluke, modelo Ti32, o qual possui faixa de operação de -20°C à +600°C, tendo uma precisão de  $\pm 2^\circ\text{C}$ , permitindo ainda ter correção de Emissividade via software SmartView. Podendo ser aplicado em qualquer indústria que tenha necessidade de observação e controle de temperatura.

Para posterior execução da ISF, foi confeccionada uma ferramenta com ponta semiesférica, em aço 4340, com diâmetro de 15mm, com rebaixos planos no corpo cilíndrico da ferramenta, onde os *Strain Gages* foram fixados por meio de material colante a base de éster de cianocrilato. Recomenda-se uma cola de secagem rápida para que o processo de cura seja mais breve, ocorrendo a fixação por todo o corpo do *Strain Gage*. A ferramenta com o posicionamento dos *Strain Gages* pode ser observada na Figura 3.



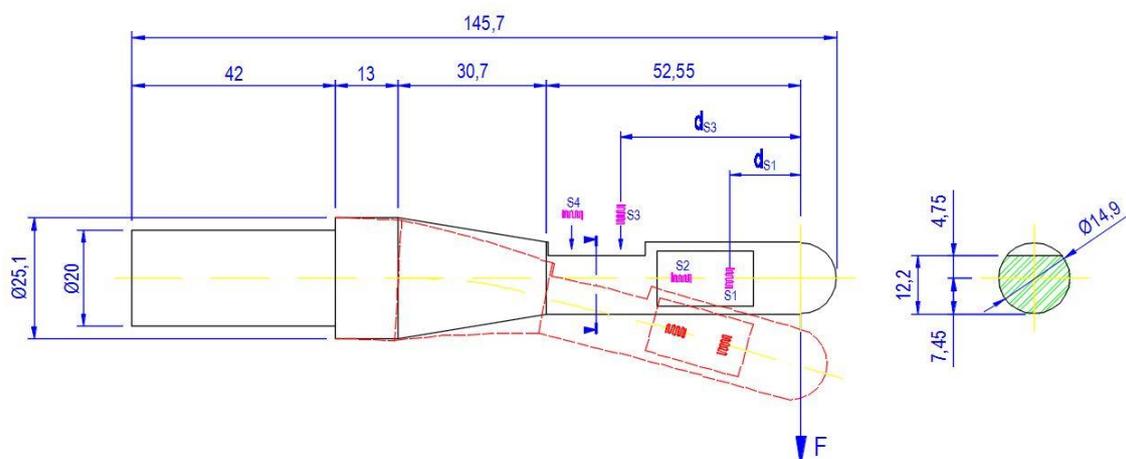
**Figura 3:** Posicionamento dos Strain Gages na ferramenta de Estampagem Incremental.

Além dos recursos físicos (hardware), também foram utilizados recursos de software ligados a computador para serem efetuados os procedimentos experimentais. Para a comunicação dos dados de leitura dos sinais dos *Strain Gages*, foi utilizado o software QuantumX da HBM, para a leitura e interpretação dos sinais foi utilizado o software Catman Easy. Além da utilização do software Matlab para processamento dos sinais adquiridos.

### 2.1. Métodos aplicados no experimento

O presente trabalho foi dividido em duas etapas, primeiramente foram utilizados métodos analíticos para análise das tensões com diferentes cargas aplicadas na ferramenta. E, além dos métodos analíticos foram aplicados conceitos de Extensometria para coleta de deformações e posteriormente comparar com os dados previamente calculados.

O procedimento experimental desenvolvido neste trabalho servirá de base para posterior aplicação em um Centro de Usinagem efetuando o processo de Estampagem Incremental, por isso, para a calibração e análise das tensões na ferramenta, assume-se que a mesma apresenta o movimento de flexão, conforme observado na **Figura 4**.



**Figura 4:** Exemplificação de momento fletor na Ferramenta de Estampagem Incremental.

## 2.2. Método Analítico

A partir do movimento apresentado pela ferramenta durante o processo de calibração, os cálculos analíticos foram executados conforme definições matemáticas do Momento Fletor. O momento Fletor é definido por:

$$M = F \cdot d \quad (3)$$

E ainda:

$$\sigma_x = \frac{M \cdot y}{I_z} \quad (4)$$

Portanto:

$$\sigma_x = \frac{F \cdot d \cdot y}{I_z} \quad (5)$$

Onde:

$\sigma_x$ : Tensão normal em x.

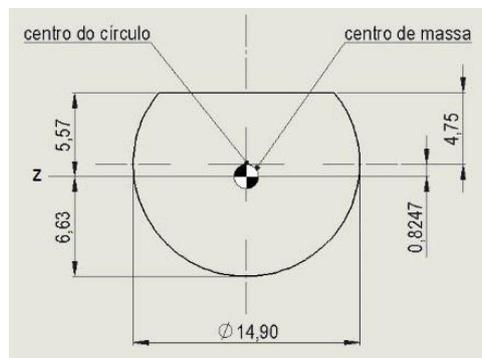
F: Força ou carga aplicada na Ferramenta;

d: distância do centro do *Strain Gage* ao ponto de aplicação da Força/Carga;

y: É a distância do ponto de medição da tensão ao eixo centroide da seção;

Iz: Momento de Inércia em z;

A partir da análise da **Figura 4**, pode-se observar o detalhamento dos valores de  $d_{S1}$  (para o sensor da ponta da ferramenta), tem-se  $d_{S1} = 16\text{mm}$  e para o  $d_{S3} = 36\text{mm}$ . E para o Eixo centroide da Ferramenta temos  $y=5,57\text{mm}$ , que pode ser observado na **Figura 5**. Além disso, para o Momento de Inércia da seção da ferramenta foi utilizado a seguinte definição.



**Figura 5:** Detalhes do Centroide da Ferramenta.

O momento de inércia ( $I_z$ ) foi calculado a partir da Teoria dos Eixos Paralelos ou Teorema de Steiner, que é definido por uma relação entre o momento de inércia  $I_p$  em relação a um eixo por um ponto P arbitrário e o Momento de Inércia  $I_{cm}$  em relação a um eixo paralelo passando pelo centro geométrico da área que representa a seção do objeto [17]. A partir da **Figura 4** e **Figura 5** calcula-se o Momento de Inércia para a Ferramenta aqui apresentada, sendo dividida em duas etapas, um Momento calculado para o círculo diminuindo-se do Momento da seção retirada da geometria.

Para o círculo, tem-se:

$$I_z = \frac{\pi r^4}{4} = 2419,44\text{mm}^4 \quad (6)$$

Para a seção Retirada da Ferramenta, tem-se:

$$I_{z'} = \frac{r^4}{8} \left( 2\theta - \frac{1}{2} \text{sen} (2\theta) \right) = 488,15 \text{mm}^4 \quad (7)$$

Aplicando-se o Teorema de Steiner

$$I_z = \left( \frac{\pi r^4}{4} + (\pi r^2 \cdot y'^2) \right) - (I_{z'} - (s \cdot y'^2)) = 2035,24 \text{mm}^4 \quad (8)$$

Onde:

r: Raio da circunferência completa;

y': Diferença entre o centroide original da circunferência com a nova geometria

Iz': Momento de Inércia da parte retirada da Circunferência completa;

S: Área da parte retirada da Circunferência completa;

Portanto, para os cálculos o Momento de Inércia em Z utilizado foi de  $I_z = 2035,24 \text{mm}^4$ . Desta forma, a partir dos dados coletados junto a ferramenta aplica-se a Equação (5) para cálculo das tensões. Sendo utilizados os pesos calibrados e com massa especificada de 5kg, 10kg, 15kg e 20kg.

Para o Caso (i): tendo  $F=5\text{kg} \rightarrow F = 5 \cdot 9,81 = 49,05\text{N}$ .

$$\sigma_{x_{S1}} = \frac{49,05\text{N} \cdot 16\text{mm} \cdot 5,57\text{mm}}{2035,24\text{mm}^4} = 2,14\text{N/mm}^2$$

$$\sigma_{x_{S3}} = \frac{49,05\text{N} \cdot 36\text{mm} \cdot 5,57\text{mm}}{2035,24\text{mm}^4} = 4,83\text{N/mm}^2$$

Para o Caso (ii): tendo  $F=10\text{kg} \rightarrow F=98,1\text{N}$ .

$$\sigma_{x_{S1}} = \frac{98,1\text{N} \cdot 16\text{mm} \cdot 5,57\text{mm}}{2270,1000\text{mm}^4} = 4,29\text{N/mm}^2$$

$$\sigma_{x_{S3}} = \frac{98,1\text{N} \cdot 36\text{mm} \cdot 5,57\text{mm}}{2270,1000\text{mm}^4} = 9,66\text{N/mm}^2$$

Para o Caso (iii): tendo  $F=15\text{kg} \rightarrow F=147,15\text{N}$ .

$$\sigma_{x_{S1}} = \frac{147,15\text{N} \cdot 16\text{mm} \cdot 5,57\text{mm}}{2270,1000\text{mm}^4} = 6,45\text{N/mm}^2$$

$$\sigma_{x_{S3}} = \frac{147,15\text{N} \cdot 36\text{mm} \cdot 5,57\text{mm}}{2270,1000\text{mm}^4} = 14,53\text{N/mm}^2$$

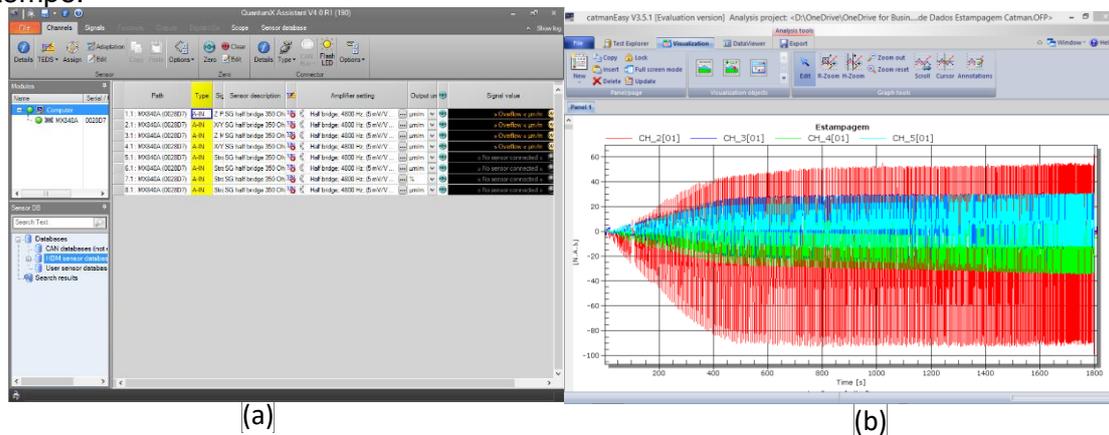
Para o Caso (iv): tendo  $F=20\text{kg} \rightarrow F=196,2\text{N}$ .

$$\sigma_{x_{S1}} = \frac{196,2\text{N} \cdot 16\text{mm} \cdot 5,57\text{mm}}{2270,1000\text{mm}^4} = 8,59\text{N/mm}^2$$

$$\sigma_{x_{S3}} = \frac{196,2\text{N} \cdot 36\text{mm} \cdot 5,57\text{mm}}{2270,1000\text{mm}^4} = 19,33\text{N/mm}^2$$

### 2.3. Investigação com *Strain Gages*

Os *Strain Gages* utilizados no processo foram da marca Excel Sensores, do tipo PA-06-250BA-350-L, com dimensões de 6mm de comprimento e 3 mm de largura de grelha. Este modelo de *Strain Gage* permite a medição de deformações axiais. Após as etapas de colagem, cura e soldagem dos filamentos de aquisição de dados, para a sequência do processo de calibração dos *Strain Gages* foi utilizado o DAQ (*Data Acquisition System*) da HBM, contemplando hardware e software para aquisição. Foram ainda utilizados os softwares Quantum X Assistant que pode ser observado sua tela na Figura 6a, este possuindo a função de comunicação entre a Ponte externa, que está ligada aos *Strain Gages* e o Computador, dispositivo necessário para armazenamento dos dados aquisitados. E, para a leitura e interpretação dos sinais coletados foi utilizado o software Catman Easy (Figura 6b), que fornece os gráficos da medição em função do tempo.



(a) (b)  
**Figura 6:** Software Quantum X (a) e Catman Easy (b).

Para a calibração dos *Strain Gages* a ferramenta foi fixada em uma morsa de bancada, onde os blocos padronizados são pendurados por cabo de aço fixado na própria ferramenta durante pelo menos 60 segundos para cada peso. Recomenda-se durante as trocas dos pesos, que se faça uma observação dos dados de medição, para verificação se o sensor retorne próximo a medição de 0mV. O processo foi executado em dois momentos, em um primeiro momento (

Figura 7a) calibrou-se S1. Em um segundo momento (

Figura 7b) executou-se o processo de calibração do S3 [18][19].



(a)



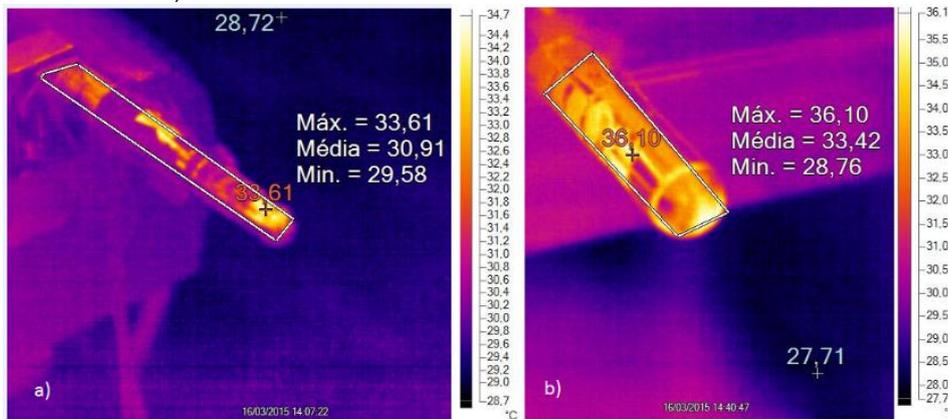
(b)

**Figura 7:** Uso de 15kg para calibração de S1 (a) Uso de 10kg para calibração de S3(b).

Após a etapa de colocação dos pesos para calibração dos *Strain Gages*, os dados foram coletados e processados em software Matlab.

#### 2.4. Controle de Temperatura

O controle da temperatura durante o experimento foi efetuado objetivando-se a validação da variação da temperatura durante a calibração dos *Strain Gages*. Observou-se que durante todo o processo de calibração a temperatura na ferramenta não variou muito com relação ao ambiente que estava em aproximadamente 27°C, pode-se verificar pela Figura 8a que a temperatura inicial da ferramenta, onde a média na ferramenta foi de 30,91°C, sendo a ponta da ferramenta o ponto mais quente da mesma, com uma temperatura de 33,61°C. Na Figura 8b, observa-se as temperaturas ao final do processo de calibração. A temperatura média está em 33,42°C, sendo o ponto mais quente um dos *Strain Gages*, com uma temperatura de 36,10°C. Um aumento de aproximadamente 2,49°C.



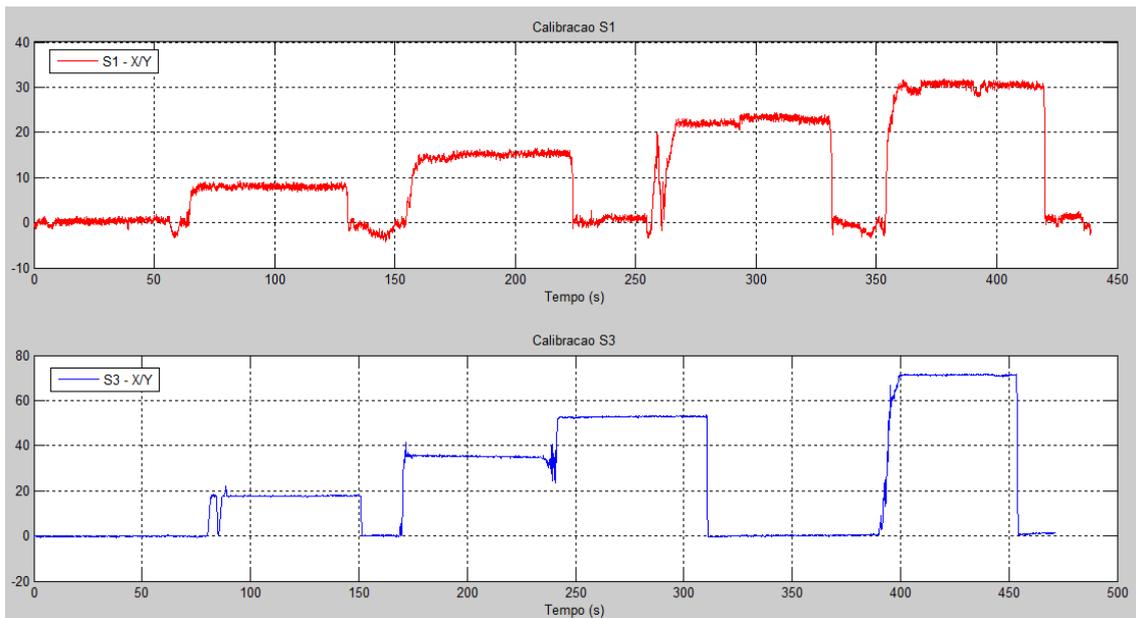
**Figura 8:** a) Inicio Calibração, b) Final Calibração.

Conforme recomendação do fabricante, a partir das especificações referentes ao lote de fabricação do *Strain Gage* utilizado nos experimentos, somente em variações de temperatura acima de 10°C deve-se considerar alterações na deformação do *Strain Gage* em decorrência da temperatura. Durante todo o processo de estampagem a temperatura também não variou mais que 5°C, portanto será desconsiderada a recomendação do fabricante de contabilizar a deformação em função da temperatura.

#### 2.5. Processamento em Matlab

O algoritmo usado para o processamento do sinal pode ser dividido em algumas etapas, uma primeira chamada de pré-processamento, onde tem-se a entrada de dados, efetuamos a importação dos dados gerados pelo software Catman em formato ASC, este arquivo traz os dados gerados das leituras dos *Strain Gages* durante a colocação dos pesos. A segunda etapa do algoritmo trata-se da geração dos gráficos de leitura dos valores apresentados e posterior aplicação de fórmulas para cálculo das tensões. Para esta etapa foi utilizado a Lei de Hooke (Equação 2), isolando-se a tensão  $(\sigma) \frac{\sigma}{\epsilon} = E$  (2para comparação dos dados apresentados pelo *Strain Gage*. Desta forma:

Os valores lidos nos *Strain Gages* durante a calibração podem ser observados na Figura 9 para o S1 e para o S3.



**Figura 9:** Valores lidos nos Sensores S1 e S3 durante a calibração.

A partir dos dados apresentados na Calibração foram efetuados os cálculos conforme Equação (2), os mesmos são apresentados na Tabela 1:

**Tabela 1:** Dados lidos a partir dos Strain Gages na Ferramenta.

| Ensaio | Carga         | S1 (Ponta)                     |                            | S3 (Meio)                      |                            |
|--------|---------------|--------------------------------|----------------------------|--------------------------------|----------------------------|
|        |               | $\epsilon$ ( $\mu\text{m/m}$ ) | Tensão ( $\text{N/mm}^2$ ) | $\epsilon$ ( $\mu\text{m/m}$ ) | Tensão ( $\text{N/mm}^2$ ) |
| 1      | 49,05N (5kg)  | 8                              | 1,68                       | 17,5                           | 3,675                      |
| 2      | 98,1N (10kg)  | 15                             | 3,15                       | 35                             | 7,35                       |
| 3      | 147,5N (15kg) | 23                             | 4,83                       | 53                             | 11,13                      |
| 4      | 196,2N (20kg) | 31                             | 6,51                       | 71                             | 14,91                      |

### 3. RESULTADOS

A **Tabela 2** demonstra o comparativo dos valores encontrados pelo Cálculo Analítico com os dados calculados a partir das deformações lidas pelos *Strain Gages*.

**Tabela 2:** Dados comparativos entre Cálculo Analítico e Leitura dos Strain Gages.

| Carga         | S1                                    |  |           | S3                                    |  |           |
|---------------|---------------------------------------|--|-----------|---------------------------------------|--|-----------|
|               | Cálculo Analítico ( $\text{N/mm}^2$ ) | Tensão coletado experimentalmente por <i>Strain Gage</i> ( $\text{N/mm}^2$ ) | % de Erro | Cálculo Analítico ( $\text{N/mm}^2$ ) | Tensão coletado experimentalmente por <i>Strain Gage</i> ( $\text{N/mm}^2$ ) | % de Erro |
| 49,05N (5kg)  | 2,14                                  | 1,68   | 21,49     | 4,83                                  | 3,675  | 23,91     |
| 98,1N (10kg)  | 4,29                                  | 3,15   | 26,57     | 9,66                                  | 7,35   | 23,91     |
| 147,5N (15kg) | 6,45                                  | 4,83   | 25,11     | 14,53                                 | 11,13  | 23,39     |
| 196,2N (20kg) | 8,59                                  | 6,51   | 24,21     | 19,33                                 | 14,91  | 22,86     |

Pelos dados apresentados na **Tabela 2** o valor médio de erro obtido para o Sensor 1, contemplando a ponta da ferramenta ficou em 24,34%. Para os dados lidos no Sensor 3, tem-se uma média de 23,51%. Comparando com o resultado do trabalho

de Imran e Haneef [20], que alcançaram um valor médio de 13,22% os resultados obtidos nesta investigação apresentaram discrepância de 10% acima da literatura pesquisada. Tal diferença dos valores pode ser atribuída a fatores como a colagem dos *Strain Gages*, a ruídos no sistema de leitura. E a principal característica que os autores julgam seja de grande influência está na resistividade dos fios elétricos usados no experimento, como são adquiridos valores bastante pequenos de tensão na casa de mV, julgamos que pode estar diretamente ligado a resistividade do fio utilizado.

#### 4. CONCLUSÃO

Por meio do experimento aqui efetuado, foi demonstrado que é possível aplicar a Extensometria no processo de leitura de deformação em ferramentas para ser aplicados a Estampagem Incremental. Ficou comprovado que o uso deste ensaio não destrutivo poderá ser aplicado ao processo de ISF, e ainda que é possível efetuar a medição de Forças nos eixos X, Y e Z com o método aqui apresentado.

Deve-se ressaltar que os dados aqui apresentados possuem uma margem de erro considerável. Deverão ser implementadas técnicas e outros testes para tentar diminuir a probabilidade de erro, tentando uma aproximação dos valores lidos no Sistema de Instrumentação para com os dados calculados analiticamente.

A calibração aqui apresentada pode ser usada como técnica aplicada em *Strain Gages* devido a linearidade apresentada com uso dos pesos de massa especificada. Observou-se ainda que para este caso a temperatura não teve influência sobre a deformação da ferramenta, já que a variação da temperatura na ferramenta em relação a temperatura ambiente pode ser desprezível. O uso da engenharia de controle aplicada ao processo industrial inovador como em ferramentas de Estampagem Incremental é aplicável e pode ser expandido o uso dos mesmos para outros processos de fabricação.

Além disso, pode-se observar que por meio da aquisição de dados efetuadas no experimento é possível identificar e aferir Forças atuantes na ferramenta durante o processo de Estampagem Incremental. Podendo no futuro ser usado esta técnica para dimensionamento de máquinas dedicadas ao processo de estampagem incremental.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório de Transformação Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS/LdTM), ao Laboratório de Metrologia da Faculdade SATC e, em especial, à Faculdade SATC pelo apoio técnico no desenvolvimento deste projeto.

#### REFERÊNCIAS

- [1] G. et al. HIRT, "Flexible CNC Incremental Sheet Forming: Process Evaluation and Simulation", *Inst. Mater. Technol. Form.*, p. 12, 2005.
- [2] L. SCHAEFFER, *Conformação de Chapas Metálicas*. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2004.
- [3] D. Fritzen, "Estudo do Processo de Estampagem Incremental em Chapa de Latão 70/30", 2012.
- [4] M. Bambach, G. Hirt, e J. Ames, "Modeling of Optimization Strategies in the Incremental CNC Sheet Metal Forming Process", *AIP Conf. Proc.*, nº 1, p. 1969–1974, 2004.
- [5] M. B. Silva, L. M. Alves, e P. a F. Martins, "Single point incremental forming of PVC: Experimental findings and theoretical interpretation", *Eur. J. Mech. A/Solids*, vol. 29, nº 4, p. 557–566, 2010.
- [6] A. Attanasio, E. Ceretti, e C. Giardini, "Optimization of tool path in two points incremental forming", *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 177, nº 1–3, p. 409–412, 2006.
- [7] D. Nimbalkar e V. Nandedkar, "Review of Incremental Forming of Sheet Metal Components", *Int J Eng Res Appl*, vol. 3, nº 5, p. 39–51, 2013.

- [8] N. . REDDY, R. LINGAM, e J. CAO, "Incremental Metal Forming Processes in Manufacturing", *Handb. Manuf. Eng. Technol.*, p. 411 – 452, 2015.
- [9] J. Dufloy, Y. Tunçkol, A. Szekeres, e P. Vanherck, "Experimental study on force measurements for single point incremental forming", *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 189, nº 1–3, p. 65–72, 2007.
- [10] P. a F. Martins, N. Bay, M. Skjoedt, e M. B. Silva, "Theory of single point incremental forming", *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 57, nº 1, p. 247–252, 2008.
- [11] G. Ambrogio, L. Filice, e F. Micari, "A force measuring based strategy for failure prevention in incremental forming", *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 177, nº 1–3, p. 413–416, 2006.
- [12] I. Bagudanch, G. Centeno, C. Vallellano, e M. L. Garcia-Romeu, "Forming force in Single Point Incremental Forming under different bending conditions", *Procedia Eng.*, vol. 63, p. 354–360, 2013.
- [13] A. B. FIALHO, *Instrumentação industrial: conceitos, aplicações e análises*. São Paulo: Erica, 2005.
- [14] K. Hoffmann, "An Introduction to Stress Analysis and Transducer Design using Strain Gauges", *HBM Test Meas.*, p. 257, 2012.
- [15] E. O. Doebelim, "Measurement Systems Application and Design", 2003.
- [16] N. INSTRUMENTS, "Strain gauge measurement", *Natl. INSTRUMENTS*, 1998.
- [17] R. C. Hibbeler, *Resistência dos materiais*. São Paulo: Prentice Hall, 2008.
- [18] S. Chadli, N. Ababou, e a. Ababou, "Impactor calibration: Comparison between accelerometric measurements and extensometric processed data", *7th Int. Work. Syst. Signal Process. their Appl. WoSSPA 2011*, p. 275–278, 2011.
- [19] M. L. C. C. Reis, R. M. Castro, e O. a F. Mello, "Calibration uncertainty estimation of a strain-gage external balance", *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 46, nº 1, p. 24–33, 2013.
- [20] M. Imran e Dr. Mohamed Haneef, "Comparative Studies on Curved Beam Under D ifferent Loading Conditions using Strain Gauges and ANSYS", *Int. J. Eng. Res. Technol.*, vol. 4, nº 05, p. 104–107, 2015.
- [21] M. A. Sellitto e C. Walter, "Medição e controle do tempo de atravessamento em um sistema de manufatura", *Gestão & Produção*, vol. 15, nº 1, p. 135–147, 2008.